

УДК 621.3.049.77 + 004.94

Огородникова Ольга Михайловна – доцент, к.ф.-м.н.

Панин Олег Александрович – студент

Уральский государственный технический университет – УПИ, г. Екатеринбург

## КОМПЬЮТЕРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПОНЕНТОВ МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ

### Computer simulation of microsystem elements

O.M. Ogorodnikova, O.V. Panin

Urals State Technical University, Ekaterinburg

**Аннотация.** Компьютерному моделированию подвергнут термоэлектрический микропривод, управляющий положением микрозеркала в микро-опто-электро-механической системе (МОЭМС). Инструментом компьютерного исследования послужил программный комплекс ANSYS в междисциплинарной конфигурации. Верифицированы расчеты угла поворота микрозеркала в зависимости от напряжения, приложенного к пластинам актюатора. Расчетные результаты расходятся с экспериментальными значениями на 10%. **Ключевые слова.** МОЭМС, микро-опто-электро-механическая система, ANSYS, компьютерное моделирование, верификация, микрозеркало, термический актюатор

**Annotation.** The thermoelectric microdrive setting the mirror in micro-opto-electro-mechanical system (MOEMS) is simulated with aid of ANSYS multiphysics tool. The calculations of rotation angle for mirror depending on voltage difference across the pads of thermal actuators are verified. The difference of calculated results and experimental data does not exceed 10%.

**Key words.** MOEMS, micro-opto-electro-mechanical system, ANSYS, simulation, verification, mirror, thermal actuator

### Введение. Проблемы проектирования МЭМС

Динамичное развитие высокоточных технологий позволяет не только проектировать и производить технические системы все меньших размеров, но и объединять в пределах одного компактного устройства все большее количество функциональных возможностей. Интеграция на одном кристалле достижений в области электроники и механики привела к созданию микроэлектромеханических систем (МЭМС), в которых кремний работает одновременно как полупроводниковый и конструкционный материал, а гальванические связи находятся в тесном взаимодействии с механическими перемещениями. Современные МЭМС представляют собой сформированные на одной подложке датчики, микромеханизмы, устройства управления с размерами элементов около нескольких микрометров и менее. Такие системы изготавливаются с применением технологий микроэлектроники, но отличаются от собственно микроэлектронных устройств наличием пространственной размерности. Если изделия микроэлектроники планарны и механически статичны, то управляемые микромеханические объекты – это реальные трехмерные конструкции, отдельные элементы которых должны иметь свободу относительных механических перемещений в пространстве [1].

Специфика проектирования и расчета микромеханики обусловлена прежде всего масштабным фактором, который проявляется в возрастающей роли поверхностных сил



трения и адгезии по сравнению с объемными инерционными силами, а также в ухудшении теплоотвода из рабочей зоны. При моделировании микромеханических систем принципиально важными становятся условия сопряжения деталей, в то время как в обычных машинах соотношение поверхностных и объемных сил не является столь актуальным и не учитывается в традиционной практике расчета и конструирования их деталей. Поверхностные эффекты могут увеличить трение до такой степени, что вся выходная мощность устройства будет сводиться к преодолению сил трения. Моделирование микромеханических систем требует тщательной формулировки контактных условий и становится эффективным, когда для анализа физических процессов используются компьютерные методы, базирующиеся на конечно-элементном решении дифференциальных уравнений, описывающих эти процессы [2].

Конструкционные задачи микромеханики отличаются также сложными механическими и контактными характеристиками материалов. Поскольку микроэлектронные технологии основаны на использовании кремния и его оксидов, механические и трибологические характеристики которых достаточно низки, для повышения эксплуатационных свойств различных элементов микросистем применяются специальные сверхтонкие покрытия или проводится особая модификация поверхностного слоя методами ионной имплантации или лазерной обработки.

Проектирование МЭМС, таким образом, требует не только совместных усилий специалистов в области механики и электроники, но и дополнительных исследований, позволяющих корректировать модельные представления о проектируемых изделиях.

Важность компьютерного проектирования обусловлена высокой ценовой ответственностью этого этапа за каждый следующий шаг в жизненном цикле изделия. Обычно издержки на проектирование МЭМС составляют 10 % от общей стоимости изделия, но оно несёт ответственность за 70-80% его общей стоимости в связи с высокой стоимостью и трудоемкостью изготовления опытных образцов для микросистем.

### **Междисциплинарный анализ МОЭМС**

Большой интерес представляют оптические приборы на базе микрозеркал с управляемым изменением ориентации в пространстве [3]. Микрооптоэлектромеханические устройства (МОЭМС) обеспечивают выполнение различных функций за счет управления оптическим сигналом или преобразования оптического воздействия с помощью электромеханического микроустройства [4]. Для получения надёжных, функциональных и относительно дешёвых МОЭМС принципиально важным становится этап проектирования и компьютерного моделирования. Специфика компьютерного моделирования МОЭМС заключается в необходимости решать для одной микромеханической системы несколько задач, различных по физической природе. Такие комплексные задачи носят название междисциплинарных и требуют особой организации вычислительных алгоритмов по совместному решению, например, в случае МОЭМС – уравнений механики, теплопередачи и электростатики.

### **Цель работы**

Основная цель данной работы – развитие компьютерных методов проектирования МОЭМС, разработка методов междисциплинарного расчета механических микроустройств и верификация разработанных методов сравнением расчетных углов поворота микрозеркала с экспериментальной кривой, отражающей зависимость угла поворота микрозеркала от напряжения, приложенного к пластинам актюатора.

### **Объект исследования**



В данной работе компьютерному моделированию был подвергнут термоэлектрический микропривод, управляющий положением зеркала в микросистеме (рис.1) с габаритными размерами менее 1 мм. Микропривод осуществляет возвратно-поступательное движение и перемещается шестью электротермическими актюаторами. Согласно существующей классификации [5], актюатор – это преобразователь энергии, активно воздействующий на систему в соответствии с выходным сигналом, поступившим от процессора. Электротермические актюаторы имеют ряд преимуществ: они просты по конструкции и в изготовлении, а также вырабатывают достаточно большое усилие на единицу объема при невысоком уровне сигнала. Применение таких актюаторов ограничивается низкочастотной областью. Устройство, использованное авторами для верификации расчетных методов, может использоваться в системах обработки информации, а также в системах машинного зрения. Многоканальные микрзеркальные устройства могут быть использованы, в том числе, для кодирования и декодирования информации.

### **Инструмент компьютерного исследования**

Инструментом компьютерного исследования послужил программный комплекс ANSYS в междисциплинарной конфигурации. Наличие всех необходимых модулей и развитых решателей позволяет достаточно точно прогнозировать поведение МОЭМС средствами ANSYS, что широко используется исследователями при проверке сложных моделей поведения микромеханических конструкций с учетом эффектов трения и остаточных деформаций [2,6].

Объемная геометрическая модель микросистемы построена в CAD КОМПАС (рис.2) по фотоматериалам AFIT – Air Force Institute of Technology [5,7], исходя из известных технологий и принципов изготовления компонентов подобных микросистем.

### **Принцип действия микропривода**

Поворот зеркала вокруг горизонтальной оси происходит за счёт движения связанного с ним термоэлектрического микропривода. Движение привода обусловлено термическими деформациями, возникающими при срабатывании шести актюаторов массива. Каждый актюатор состоит из двух пластин различной ширины, которые соединены между собой, установлены параллельно и закреплены на подкладке анкерами (рис.3). Нагрев пластин актюатора происходит за счет выделения тепла при протекании через них электрического тока.

За счет разности потенциалов между анкерами в пластинах протекает электрический ток. Сопротивление узкой пластины больше, чем сопротивление широкой пластины; соответственно, на узкой пластине создается большее напряжение, выделяется больше тепла, в итоге узкая пластина нагревается до более высокой температуры и в большей степени деформируется. В результате каждый актюатор изгибается в сторону широкой пластины, микропривод приходит в движение и поворачивает зеркало.

### **Последовательность расчетов**

Моделирование описанной микросистемы требует решения на конечно-элементной сетке трех задач: электрической, тепловой и механической. Решение проведено в два этапа. На первом этапе решена связанная задача электрическая-тепловая и вычислено распределение температуры в системе, обусловленное разностью потенциалов 6 В на пластинах актюатора.

Расчетные результаты первого этапа транслированы на второй этап в качестве нагружения. На втором этапе решена связанная задача тепловая-механическая и найдены



смещения, обусловленные термической деформацией. Пластины на втором этапе закреплены, в качестве нагрузки приложены температурные поля, вычисленные на первом этапе.

Исходными данными к расчету являются свойства материала [7]: коэффициент теплопроводности 32 Вт/м·К; температурный коэффициент линейного расширения  $2,9 \times 10^{-6}$  К<sup>-1</sup>; модуль нормальной упругости 169 ГПа; коэффициент поперечного сжатия 0,22; электрическое сопротивление  $2,3 \times 10^{-5}$  Ом·м.

### Результаты расчета и их обсуждение

Максимальное осевое смещения актюатора получилось в расчете равным 50 мкм. Соответствующий расчетным перемещениям угол наклона зеркала при этом составляет 22° (рис.4), что на 10% отличается от экспериментального значения на градуировочной кривой (рис.5) для данного устройства. Небольшое расхождение расчетных и экспериментальных данных можно объяснить, в частности, несовпадением площади контакта конструктивных элементов привода в геометрической модели с реальным их перекрытием в МОЭМС, что влияет на условия теплопередачи и трение. В целом, результаты расчета являются достаточно точными и свидетельствуют о том, что применяемые методы и условия расчета можно распространить на аналогичные МОЭМС другой конфигурации.

### Выводы

Главным результатом работы является верифицированная методика компьютерного междисциплинарного анализа микроэлектромеханической системы. Разработан и проверен метод расчета МОЭМС с электро-термическими актюаторами в программной среде ANSYS. Данный метод может быть использован при проектировании аналогичных МОЭМС.

### Литература

1. Шалобаев Е. В., Старжинский В. Е., Шилько С. В. Технология изготовления зубчатых колес и передач для микроэлектромеханических систем. Зубчатые микромеханизмы МЭМС: опыт производства и постановка задач на перспективу // Микросистемная техника, 2003, № 10. – С.2-5.
2. Гридчин А.В., Колчужин В.А., Герлах У.Г. Исследование четырехконтактных тензочувствительных структур методом конечно-элементного моделирования // Нано- и микросистемная техника, 2007, № 5. – С.38-42.
3. Яшин К.Д., Осипович В.С., Божко Т.Г. Разработка МЭМС // Нано- и микросистемная техника, 2008, № 1. – С.28-34.
4. Вернер В.Д., Иванов А.А., Коломенская Н.Г. и др. Изделия микросистемной техники – основные понятия и термины // Нано- и микросистемная техника, 2007, № 12. – С.2-5.
5. Starman L. Micro-Electro-Mechanical Systems// Wright State University, 2006. – Сайт: <http://www.cs.wright.edu/people/faculty/kxue/mems/>
6. Огородникова О.М., Юрченко А.С. Возможности программного комплекса ANSYS для моделирования микросистемной техники // Новые информационные технологии в нефтегазовой отрасли и образовании: Сб.материалов II международной научно-технической конференции. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2006. – С.142-143.
7. Hongbin Yu, Peng Wu, Yan Liu, Jun Li, Haiqing Chen. Characterization of a novel segmented micro mirror // Microsystem Technology, 2008, v.14. – P.173-177.



## Иллюстрации

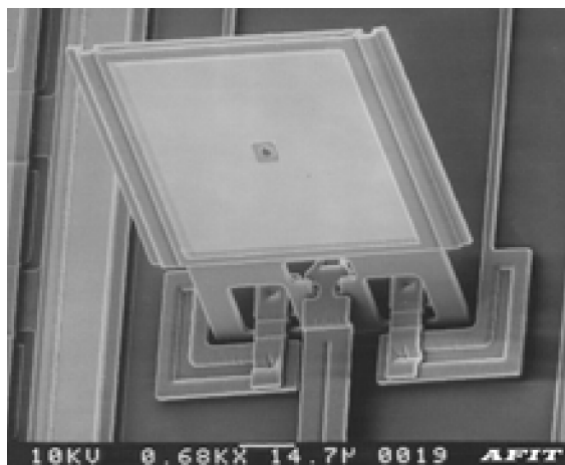


Рис.1. Микрозеркало [5]

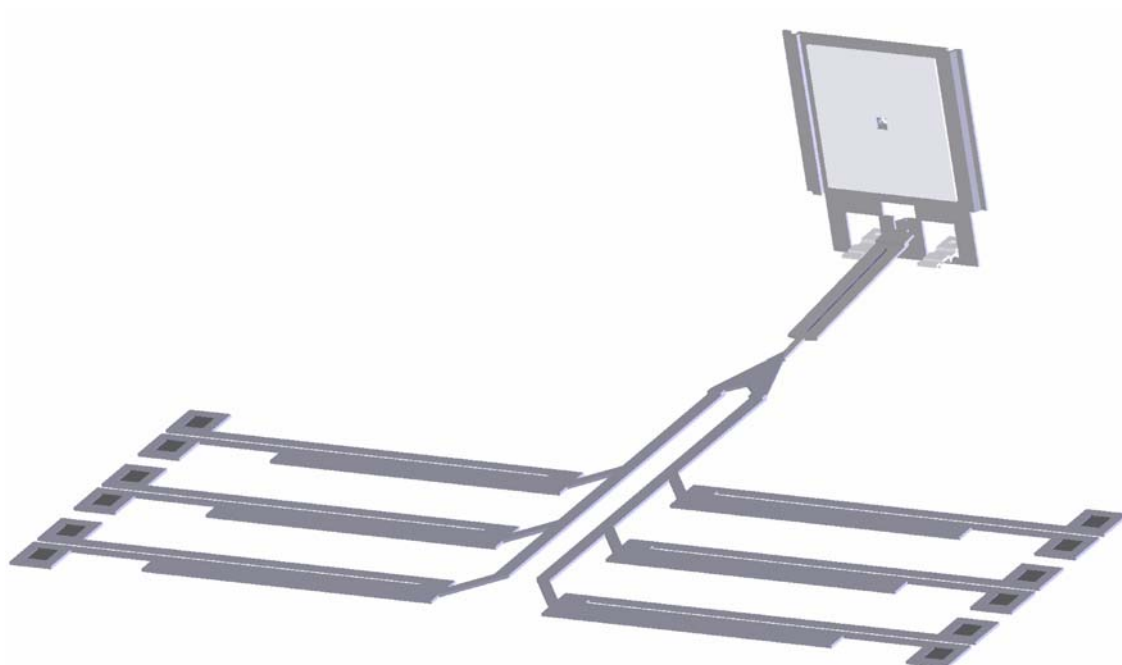


Рис.2. Геометрическая модель микросистемы, построенная в CAD КОМПАС



Рис.3. Внешний вид актюатора [7]



1

NODAL SOLUTION  
 STEP=1  
 SUB =1  
 TIME=1  
 UY (AVG)  
 RSYS=0  
 DMX =.513E-04  
 SMN =-.513E-04  
 SMX =.468E-08



MAR 7 2008  
 15:55:16

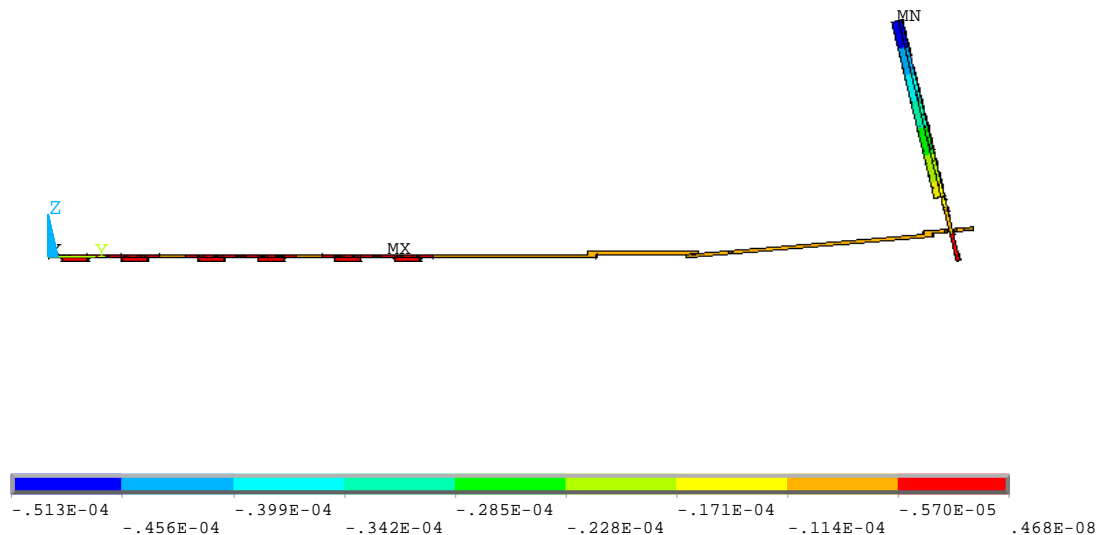


Рис.4. Осьевые смещения и расчетный поворот микрозеркала приводом

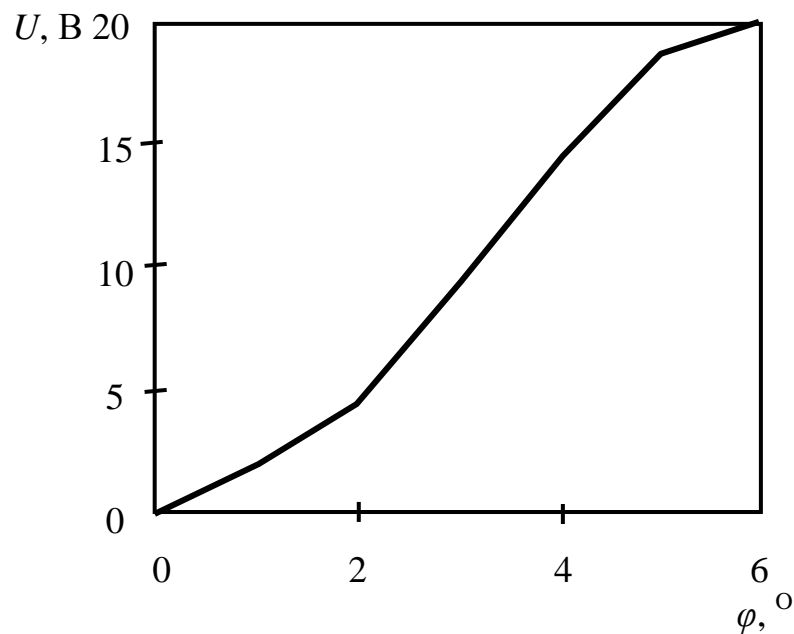


Рис.5. Экспериментальная зависимость для микросистемы:  
 по горизонтали отложена разность потенциалов в вольтах ( $U$ ),  
 по вертикали – угол поворота зеркала в градусах ( $\varphi$ ) [5]

